

Schätzung zur Energiespeicherung für erneuerbare Energien

Dipl.-Ing. Univ. Michael Klotsche

Datum: 24.05.24

Rudolf-Breitscheid-Straße 6
02727 Ebersbach-Neugersdorf
mk@ib-klotsche.de

240524_Fermi-Schaetzung-Energiespeicherung_016.odt

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	3
2. Potential der Solarenergie.....	4
3. Speicherzeiten.....	5
4. Überlegungen zur kurzfristigen Speicherung.....	5
5. Energiespeicherdichten.....	7
6. Berechnungen zur Energiespeicherung.....	10
6.1 Materialaufwand für Speicherbehälter.....	10
6.2 Energiespeicherdichte von Wasserstoff und Methan.....	11
6.3 Lithiumanteil in Lithium-Ionen-Akkumulatoren.....	14
6.4 Flächenbedarf für Pumpspeicherwerke.....	15
6.5 Schwungmassespeicher.....	17
6.6 Druckluftspeicher.....	18
6.6 Wasserstoffspeicher.....	19
Fazit.....	20
Anhang.....	21

1. Einleitung

Der Zugang zu gespeicherter Energie entscheidet darüber, wo sich Imperien etablieren und halten können. Militärische Macht benötigt jederzeit verfügbare gespeicherte Energie für die Materialschlachten. Bisher war billige und ständig verfügbare gespeicherte Energie im Überfluss die Quelle der Macht der Industrieländer. Wenn irgendwo Konflikte geschürt, Kriege geführt und Flüchtlingsbewegung initiiert werden, geht es um den Zugang zu gespeicherter Energie und zu den Rohstoffen für die Energiegewinnung und Energiespeicherung. Um Fragen bezüglich der Energiespeicherung besser einschätzen zu können, sollen im Folgenden Text Fragestellungen bezüglich der Energiespeicherung betrachtet werden.

Der folgende Text hat nicht den Anspruch einer literarisch hohen Qualität. Er soll lediglich einige Informationen zusammenstellen, so dass diese in in Form eines Nachschlagewerkes schnell gefunden werden können.

2. Potential der Solarenergie

Für die Abschätzung des Potentials der verfügbaren Solarenergie soll angenommen werden, dass Solaranlagen auf Siedlungsflächen installiert werden sollen. Das erlaubt die Nutzung von Hybridkollektoren, die auf der selben Fläche elektrische Energie und Wärmeenergie erzeugen können. Die Größe aller Siedlungsflächen inklusive Freiflächen ohne Verkehrswege in der Bundesrepublik Deutschland¹ beträgt 25000 km². Angenommen, die Grundflächen aller Gebäude dieser Siedlungsflächen haben daran einen Anteil von 20%. Für die Berechnung werden folgende Formelzeichen verwendet:

τ_{Gr} : Flächenanteil der Gebäudegrundflächen an den Siedlungsflächen

η_{PV} : Elektrischer Wirkungsgrad der Photovoltaik

η_{th} : Thermischer Wirkungsgrad der Solarthermie eines Hybridkollektors

A_{Sied} : Summe aller Siedlungsflächen ohne Verkehrsflächen in der BRD in km²

q_S : Globalstrahlungsdichte der Sonnenstrahlung horizontal in kWh/(m² a)

$E_{G,S}$: Globalstrahlung auf alle Gebäudegrundflächen in TWh/a

$E_{el,S}$: Elektrische Energie der Photovoltaik in der BRD in TWh/a

$E_{th,S}$: Thermische Energie der Hybridkollektoren in der BRD in TWh/a

Dann kann die gesamte Sonnenenergie (Globalstrahlung), die auf diese horizontale Fläche fällt, wie folgt überschlägig berechnet werden:

$$E_{G,S} = \tau_{Gr} \cdot A_{Sied} \cdot q_S = 0,2 \cdot 25000 \cdot 10^6 m^2 \cdot 1 \frac{MWh}{m^2 a} = 5000 \frac{TWh}{a}$$

Über Photovoltaik kann dann die Globalstrahlung in elektrischen Strom umgewandelt werden. Der Wirkungsgrad der Photovoltaik wird dabei mit 20 % angenommen. Die Menge der verfügbaren elektrischen Energie aus Photovoltaik ergibt sich dann wie folgt:

$$E_{el,S} = \eta_{PV} \cdot E_{S,G} = 0,2 \cdot 5000 \frac{TWh}{a} = 1000 \frac{TWh}{a}$$

Über Hybridkollektoren kann über die Photovoltaikflächen gleichzeitig Wärmeenergie mit einer Temperatur zwischen 20°C und 80°C gewonnen werden. Der angenommene Wirkungsgrad soll hier bei 60% liegen. Das Problem der Energiespeicherung soll hier erst einmal noch nicht berücksichtigt werden, weil die Art der Energiespeicherung stark vom Zeitpunkt der Energiegewinnung und der Energienutzung abhängt. Das Potential der Solarthermie ergibt sich dann wie folgt:

$$E_{th,S} = \eta_{th} \cdot (E_{S,G} - E_{el,S}) = 0,6 \cdot \left(5000 \frac{TWh}{a} - 1000 \frac{TWh}{a} \right) = 2400 \frac{TWh}{a}$$

¹ <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/siedlungs-verkehrsflaeche>

3. Speicherzeiten

Es gibt für die Energiespeicherung eine entscheidende Frage: Wie lang soll der Zeitraum sein, in dem die Produktion einer Gesellschaft in den Standby-Betrieb bleiben soll? Diese Frage impliziert, dass die Energiespeicherung bei unseren technischen Möglichkeiten in zwei Kategorien eingeteilt werden kann:

Speicher für den Funktionsbetrieb

- Leistungsspitzen: Sekunden, Millisekunden
- Sehr kurzfristig: Minuten, Stunden
- Kurzfristig: Tagesertrag
- Fossil: Zeitlich unbegrenzt, wird aber aufgebraucht.

Speicher für den Standby-Betrieb

- Kurzfristig: Tagesertrag
- Mittelfristig: Wochen
- Langfristig: Monate
- Saisonal: Jahresertrag
- Fossil: Zeitlich unbegrenzt

Je größer die verfügbaren Energiespeicher sind, desto mehr kann der Funktionsbetrieb ausgeweitet und der Standby-Betrieb verringert werden. Gerade für militärische Erfordernisse muss der Funktionsbetrieb zu jeder Zeit gewährleistet sein.

4. Überlegungen zur kurzfristigen Speicherung

Unsere Gesellschaft ist darauf angewiesen, zu jeder Zeit gespeicherte Energie zu Verfügung steht. Das bedeutet, dass die Sonnenenergie, die an Sonnentagen gewonnen werden kann auch für diesen Tag kurzfristig mit hohem Wirkungsgrad gespeichert werden muss. Hierzu soll eine Fermi-Schätzung durchgeführt werden.

- Aus den Berechnungen, die ich in meiner Studie² zum Potential der Erneuerbaren Energien in Deutschland angefertigt habe, soll davon ausgegangen werden, dass nach vollzogener Energiewende eine Energiemenge aus der Photovoltaik von 1000 TWh/a zu Verfügung steht.
- Die Sonnenenergie, die in einem Jahr gewonnen werden kann, trifft in dieser Annahme innerhalb von 120 Tagen ein. Das liegt zum einen daran, dass die meiste Sonnenenergie im Sommer gewonnen werden kann und dass auch im Sommer nicht

² Klotsche, M: Fermi-Schätzung zur Ermittlung des Potentials für erneuerbare Energien in Deutschland. Selbstverlag. Neugersdorf, 2023

an jedem Tag klarer Himmel ist. Das bedeutet, dass pro Sonnentag 8,3 TWh/d gespeichert werden müssen.

- Die Energiespeicherdichte von Lithium-Ionen Akkus soll großzügig mit 100 Wh/kg angenommen werden.
- Das bedeutet, dass für die Speicherung des Solarstromerträge eines Tages Lithium-Ionen Akkus mit einer Masse von $83 \cdot 10^9$ kg erforderlich sind.
- In Deutschland gibt es ungefähr $40 \cdot 10^6$ Haushalte.
- Das bedeutet, dass pro Haushalt eine Akkumulator Masse von 2075 kg / Haushalt zu Verfügung stehen muss. Diese Brandlast in jedem Haushalt wirft Fragen bezüglich des Brandschutzes auf.
- Die Haltbarkeit von Lithium-Ionen Akkus soll mit 2000 Ladezyklen angenommen werden.³
- Das ergibt in Anbetracht der Sonnentage im Jahr eine Lebensdauer der Akkus von 16,6 Jahren.
- Um die Lithium-Ionen-Akkus für die Speicherung der solarenergie regelmäßig zu erneuern, müssen Jährlich $5 \cdot 10^9$ kg Lithium-Ionen-Akkus produziert und ersetzt werden.
- Der Anteil an Lithium in einem Lithium-Ionen-Akku [14] beträgt mindestens 1,346%. Das bedeutet dass für die Instandhaltung der Lithium-Ionen-Akkus eine Menge von $67,3 \cdot 10^6$ kg Lithium benötigt wird. Hier sein darauf hingewiesen, dass die Welt-Lithiumproduktion⁴ bei ca. $27 \cdot 10^6$ kg/a liegt.
- Für die Speicherung von Sonnenenergie mit Lithium-Ionen Akkus für die Erträge **eines Sonnentages** im Sommer, wären Lithium-Ionen Akkus mit einer Masse von $83 \cdot 10^9$ kg erforderlich. Bei einem Lithiumanteil von 1,346% wären hierfür $1129 \cdot 10^6$ kg Lithium nötig. Das bedeutet, dass für das Ausschöpfen des solaren Energiepotentials in Deutschland die 8,9-Fache heutige Weltjahresproduktion an Lithium erforderlich wäre, obwohl Deutschland nur 1% der Weltbevölkerung hat. Daran wird deutlich sichtbar, dass Lithium-Ionen Akkus nicht unser Energiespeicherproblem lösen können.
- Lithium-Ionen Akkus enthalten auch eine große Menge Cobalt, ein seltenes Element, von dem es in den bekannten weltweiten Reserven nur $7,2 \cdot 10^6$ t gibt.⁵

3 <https://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Ionen-Akkumulator#Lebensdauer>

4 <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/159929/umfrage/minenproduktion-von-lithium-nach-laendern/>

5 U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, February 2014. Prepared by Kim B. Shedd [(703) 648-4974, kshedd@usgs.gov]

5. Energiespeicherdichten

Art des Speichers	Volumetrische Energiedichte in kWh/m ³	Gravimetrische Energiedichte in Wh/kg	Quelle
Bleiakku KFZ	99,5	50 Wh/kg	Conrad Bestell Nr. 1886826 - 62 Varta Blue Dynamic F17 Autobatterie 12 V 80 Ah ETN 580 406 074 T1 Zellanlegung 0
Lithium Ionen Akku	174,5	74	Conrad Bestell Nr. 251024 - 62 Samsung ICR18650 Spezial-Akku 18650 Kabel Li-Ion 3.7 V 2600 mAh
Superkondensatoren bei 1 V Spannungsdifferenz $E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$	0,96	0,793	Conrad Bestell Nr. 451440 - NA Samwha DB5U407M35060HA Green-Cap Kondensator 400 F 2.7 V/DC 20 % (Ø x L) 35 mm x 60 mm
Methanol gesamt	5231	6600	Recknagel ⁶ Seite 209
Strom aus Methanol bei 30% Wirkungsgrad.	1569	1980	
Wasserstoff bei 200 bar in Stahlflaschen	682	630	Eigene Berechnung mit AD 2000 Regelwerk und Recknagel
Wasserstoff bei 200 bar in Stahlflaschen bei 30% Wirkungsgrad.	204,6	190	
Methan bei 200 bar in Stahlflaschen	2123	1770	Eigene Berechnung mit AD 2000 Regelwerk Recknagel
Methan bei 200 bar in Stahlflaschen bei 30% Wirkungsgrad.	636,9	530	
Pumpspeicher mit Wasser bei 100 m Höhendifferenz	0,27	0,27	Eigene Berechnung 15
Schwungmasse Stahl bei 100 m/s	10,9	1,39	Eigene Berechnung 17

6 Recknagel; Sprenger; Schramek: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 01/02. Oldenburg Verlag

Art des Speichers	Volumetrische Energiedichte in kWh/m ³	Gravimetrische Energiedichte in Wh/kg	Quelle
Warmwasser bei einer Erwärmung um 10 °C	11,6	11,6	Stoffdaten von Wasser $Q = c \cdot m \cdot (T_2 - T_1)$
Schmelzwärme von Wasser	92,6	92,6	Speicherung von Kälte über eine Kältemischung mit Kochsalz
Druckluftspeicher bei 100 °C zwischen 1 bar und 200 bar ohne Behälter	29,5	158	Eigene Berechnung 18
Paraffin Eicosan Latentwärmespeicher 36,6 °C; 789 kg/m ³	53,3	67,5	Kübler, Rainer; Fisch, Norbert: Wärmespeicher. 3 Auflage. TÜV Verlag. Köln, 1998. Seite 14
NaSO ₄ 10H ₂ O Latentwärmespeicher 32 °C	?	66,9	Kübler, Rainer; Fisch, Norbert: Wärmespeicher. 3 Auflage. TÜV Verlag. Köln, 1998. Seite 14

Bei der chemischen Energiespeicherung in Form von Brennstoffen ist die Masse des Luftsauerstoffs, der zur Verbrennung nötig ist, nicht mit berücksichtigt. Dieser Luftsauerstoff wird von der Natur zu Verfügung gestellt.

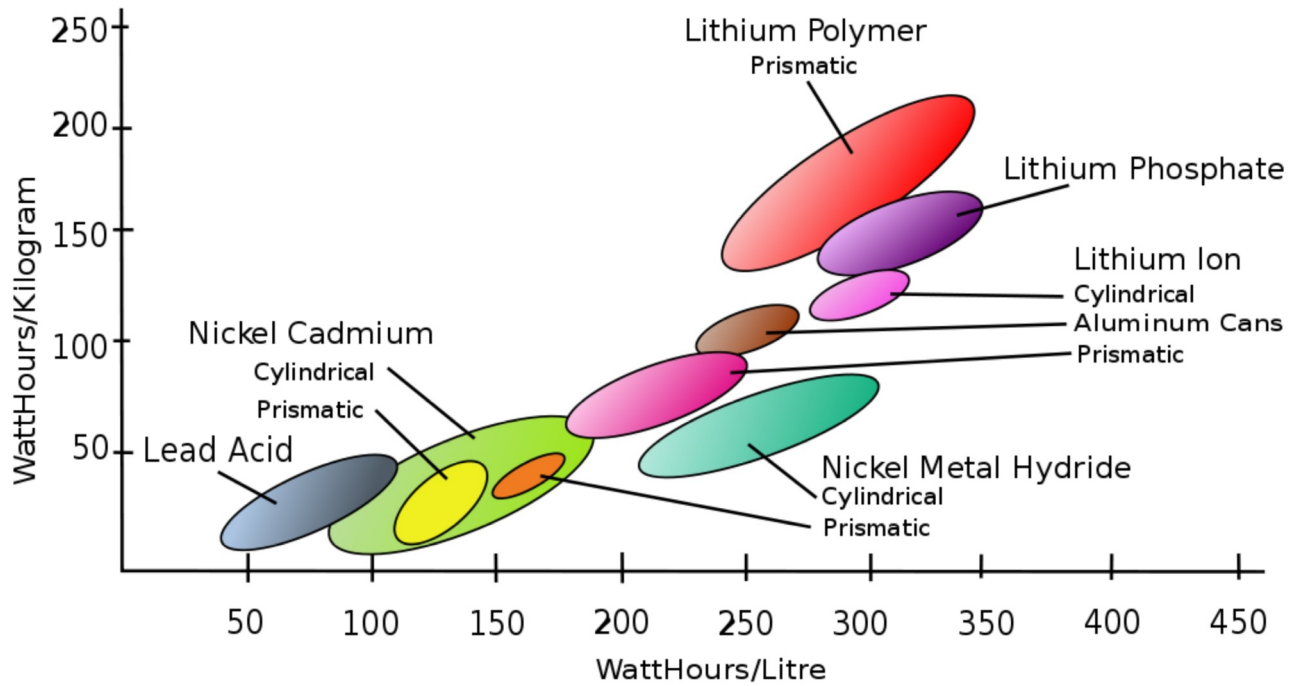


Schaubild 1: Energiedichte. Quelle: Von Original Author: Barrie Lawson - Übertragen aus en.wikipedia nach Commons durch Armando-Martin mithilfe des CommonsHelper. Original source: Electropaedia., CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9678810>

6. Berechnungen zur Energiespeicherung

6.1 Materialaufwand für Speicherbehälter

Wanddicke für Speicherbehälter ⁷ unter innerem Überdruck

s : Erforderliche Wanddicke in mm

K : Festigkeitskennwert in N/mm²

S : Sicherheitsbeiwert

D_a : Außendurchmesser in mm

p : Berechnungsdruck in bar

c₁ : Zuschlag zur Berücksichtigung von Wanddickenunterschreitung in mm

c₂ : Abnutzungszuschlag in mm

ρ_{BW} : Dichte in kg/m³

L : Länge des Speicherbehälters in m

v : Faktor zur Ausnutzung der Berechnungsspannung in Fügeverbindungen oder zur Berücksichtigung von Verschwächungen.

V_Z : Volumen der Zylinderschale in m³

V_K : Volumen der Kugelschale in m³

V_{BW} : Volumen der Behälterwand in m³

$$D_i = D_a - 2 \cdot s$$

Für Zylinderschalen gilt:

$$s = \frac{D_a \cdot p}{20 \frac{K}{S} \cdot v + p} + c_1 + c_2$$

$$V_Z = \frac{\pi}{4} \left((D_a \cdot 0,001)^2 - (D_i \cdot 0,001)^2 \right) \cdot L$$

Für Kugelschalen gilt:

⁷ Verband der TÜV e.V. (Hrsg.): AD 2000 Regelwerk. Stand 2011. Beuth Verlag. Berlin, 2011. Blatt B1

$$s = \frac{D_a \cdot p}{40 \frac{K}{S} \cdot v + p} + c_1 + c_2$$

$$V_K = \frac{\pi}{6} \left((D_a \cdot 0,001)^3 - (D_i \cdot 0,001)^3 \right)$$

Für die Wand des Speicherbehälters gilt:

$$V_{BW} = V_Z + V_K$$

$$m_{BW} = V_{BW} \cdot \rho_{BW}$$

6.2 Energiespeicherdichte von Wasserstoff und Methan

Wasserstoff ist durch die Elektrolyse von Wasser aus elektrischem Strom relativ einfach herstellbar und über Brennstoffzellen wieder in elektrischen Strom umwandelbar. Deshalb soll hier die Energiespeicherdichte von Wasserstoff betrachtet werden. Da Wasserstoff unter Normbedingungen eine sehr geringe Dichte und einen hohen Platzbedarf hat, muss er in Druckbehältern gespeichert werden. Aufgrund der hohen erforderlichen Drücke sind hierfür Druckbehälter mit hohen Wandstärken und einer großen Masse erforderlich. Dies bedeutet, dass die gravimetrische Energiedichte, aber auch die volumetrische Energiedichte verringert wird.

V_{ET} : Volumen des Energieträgers in m^3

m_{ET} : Masse des Energieträgers in kg

R : Spezifische Gaskonstante des Energieträgers in $J/(kg \cdot K)$

T : Temperatur des Energieträgers in K

p_{ET} : Druck des Energieträgers in Pa

H_0 : Oberer Heizwert des Energieträgers in J/kg

E : Energiegehalt des Speichers in J

w_V : Volumetrische Energiedichte in J/m^3

w_G : Gravimetrische Energiedichte in J/kg

$$p \cdot V_{ET} = m_{ET} \cdot R \cdot T$$

$$E = H_0 \cdot m_{ET}$$

$$V_{ET} = \frac{E \cdot R \cdot T}{H_0 \cdot p}$$

$$V = V_{ET} + V_{BW}$$

$$m = m_{ET} + m_{BW}$$

$$w_V = \frac{E}{V}$$

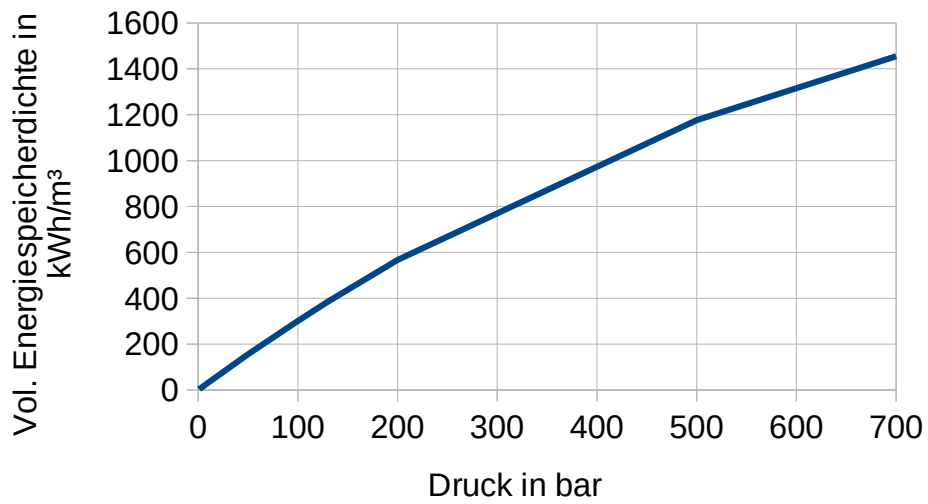
$$w_G = \frac{E}{m}$$

Für die beispielhafte Berechnung der Energiedichten von Wasserstoff und Methan, sollen folgende Zahlenwerte angenommen werden:

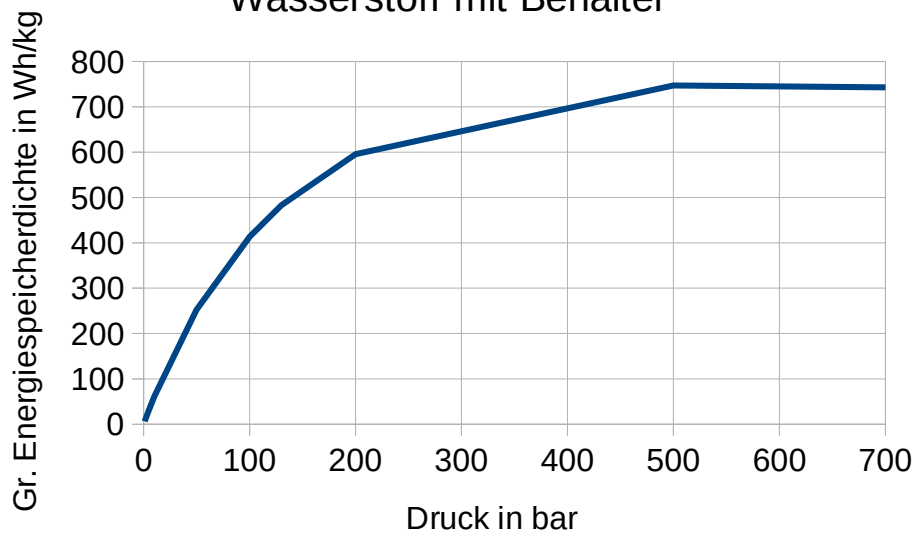
Materialaufwand von Druckbehältern zur Speicherung von Energieträgern			
Angaben			
Festigkeitskennwert in N/mm ²	K	500	N/mm ²
Sicherheitsbeiwert	s	1,5	
Zuschlag zur Berücksichtigung von Wanddickenunterschreitung in mm	c1	0	mm
Abnutzungszuschlag in mm	c2	0	mm
Dichte in kg/m ³	rBW	8000	kg/m ³
Länge des Speicherbehälters in m	L	2	m
Faktor zur Ausnutzung der Berechnungsspannung in Fügeverbindungen oder zur	v	1	
Brennwert	H0	1,42E+08	J/kg
Gaskonstante	R H2	4122,4	J/(kg K)
Temperatur	T	298	K
Außendurchmesser in mm	Da	200	mm

Aus diesen Werten ergeben sich folgende Diagramme:

Volumetrische Energiespeicherdichte Wasserstoff



Gravimetrische Energiespeicherdichte Wasserstoff mit Behälter



6.3 Lithiumanteil in Lithium-Ionen-Akkumulatoren

Der Lithiumanteil in Lithium-Ionen-Akkumulatoren soll anhand der folgenden Berechnung grob geschätzt werden. Diese Berechnung soll an einem konkreten Beispiel erfolgen. Die technischen Daten des beispielhaft betrachteten Akkumulators lauten wie folgt:

Samsung ICR18650 Spezial-Akku 18650 Kabel Li-Ion 3.7 V 2600 mAh

Ladung: $Q = 2,6 \text{ Ah} = 9360 \text{ As}$

Masse einer Akkuzelle: $m_{\text{Akku}} = 50 \text{ g}$

Pro Elektron ein Lithiumion: $z = 1$

Molmasse von Lithium: $M = 6,941 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$

Für die folgende Berechnung werden folgende Formelzeichen verwendet:

M : Molmasse in kg/mol

Q : Transportierte Ladung in C

z : Ladungszahl pro Molekül

F : Faraday-Konstante

m_{Li} : Masse des Lithiums in kg

m_{Akku} : Masse des Akkumulators in kg

e_0 : Elementarladung in C

N_A : Avogadro-Konstante in 1/mol

Für die Abgeschiedene Masse an Lithium-Ionen⁸ gilt:

$$m_{\text{Li}} = \frac{M \cdot Q}{z F}$$

$$F = e_0 \cdot N_A = 9,648533 \cdot 10^4 \frac{\text{C}}{\text{mol}} \quad z = 1$$

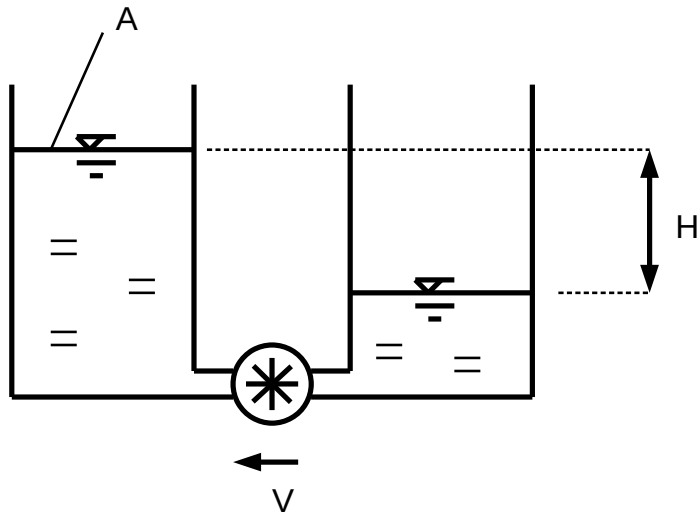
$$m_{\text{Li}} = \frac{6,941 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \cdot 9360 \text{ As}}{1 \cdot 9,648533 \cdot 10^4 \frac{\text{C}}{\text{mol}}} = 0,6733 \text{ g}$$

$$\frac{m_{\text{Li}}}{m_{\text{Akku}}} = \frac{0,6733 \text{ g}}{50 \text{ g}} = 0,01346$$

⁸ Stöcker, H: Taschenbuch der Physik. Wissenschaftlicher Verlag Harry Deutsch. Frankfurt am Main, 2010. Seite 508

6.4 Flächenbedarf für Pumpspeicherwerke

Im folgenden Text soll der Flächenbedarf geschätzt werden, der benötigt wird, um die Energie zu speichern, die an einem Tag über Photovoltaik gewonnen wird. Hier soll angenommen werden, dass das Potential an Solarenergie in Deutschland von 1000 TWh/a installiert ist.



- A : Fläche einer der beiden Speicherseen in m^2
- H_1 : Höhendifferenz im entladenen Zustand in m
- H_2 : Höhendifferenz im geladenen Zustand in m
- g : Erdbeschleunigung in m/s^2
- ρ : Dichte von Wasser in kg/m^3
- W : Arbeit in J
- V : Volumen des gepumpten Wassers in m^3

$$dm = \rho \cdot dV$$

$$dH = 2 \cdot \frac{dV}{A}$$

$$dW = dm \cdot g \cdot H$$

$$dW = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot g \cdot H \, dH$$

$$\int dW = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot g \cdot \int H \, dH$$

$$\Delta W = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot g \cdot \left[\frac{1}{2} H^2 \right]_{H_1}^{H_2}$$

$$\Delta W = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot g \cdot (H_2^2 - H_1^2)$$

$$A = \frac{4 \cdot \Delta W}{\rho \cdot g \cdot (H_2^2 - H_1^2)}$$

$$A = \frac{4 \cdot 4 \cdot 10^{12} \text{ W} \cdot 3600 \text{ s}}{998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot ((200 \text{ m})^2 - (190 \text{ m})^2)}$$

$$A = 1500 \text{ km}^2$$

Die Fläche des Bodensees in Deutschland beträgt 536 km². Es wäre also die sechsfache Fläche des Bodensees nötig, um nur den Tagesertrag des erzeugten Solarstroms bei ausgeschöpftem Energiepotential in Deutschland zu speichern.

6.5 Schwungmassespeicher

Zur Berechnung der Energiedichte von Schwungmassespeichern werden folgende Formelzeichen verwendet:

m : Masse in kg

v : Geschwindigkeit in m/s

W : Arbeit in J

d : Durchmesser der zylindrischen Schwungmasse in m

n : Drehzahl in 1/s

J : Massenträgheitsmoment kg m^2

ω : Winkelgeschwindigkeit in 1/s

Berechnung der Energie der Massenträgheit.

$$W = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Für den Fall, dass es sich um eine rotierende Schwungmasse handelt, kann die Umfangsgeschwindigkeit eines Massenelements mit folgender Gleichung berechnet werden.

$$v = d \cdot \pi \cdot n$$

Für einen rotierenden massiven Kreiszyylinder, der um seine Hauptachse rotiert, gilt für die gespeicherte Energiemenge folgende Gleichung⁹:

$$W = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$$

$$\omega = 2\pi \cdot n$$

$$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$$

9 Stöcker, H: Taschenbuch der Physik. Wissenschaftlicher Verlag Harry Deutsch. Frankfurt am Main, 2010. Seite 108 und 104

6.6 Druckluftspeicher

Im Folgenden sollen isotherme Druckluftspeicher betrachtet werden. Die Gleichungen¹⁰ zur Berechnung der gespeicherten Energie lauten wie folgt:

w_{12} : Spezifische Arbeit in J/kg

w_{V12} : Volumetrische Arbeit in J/m³

R : Gaskonstante in J/(kg K)

T : Temperatur in K

p_1 : Druck der Umgebungsluft in Pa

p_2 : Druck im geladenen Speicher in Pa

$$w_{12} = R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T}$$

Bei der Verwendung von Luft als Speichermedium gilt:

$$R = 287,2 \text{ J/(kg K)}$$

$$p_1 = 1 \text{ bar} = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$p_2 = 200 \text{ bar} = 200 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$T = 100 \text{ °C} = 373 \text{ K}$$

$$w_{12} = 287,2 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot 373 \text{ K} \cdot \ln\left(\frac{200 \text{ bar}}{1 \text{ bar}}\right) = 568 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 158 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$$

$$\rho = \frac{200 \cdot 10^5 \text{ Pa}}{287,2 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot 373 \text{ K}} = 187 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$w_{V12} = w_{12} \cdot \rho = 158 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}} \cdot 187 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 29,5 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$$

¹⁰ Kretzschmar, Hans-Joachim: Kleine Formelsammlung Technische Thermodynamik. Hanser Verlag. München, 2009. Seite 113

6.6 Wasserstoffspeicher

Die Saisonale Energiespeicherung sollte durch die Erzeugung von Wasserstoff, Methan oder Methanol erfolgen. Im folgenden soll die Speicherung von Wasserstoff betrachtet werden. Um den Text möglichst kurz zu halten und dennoch mehrere Überlegungen zu berücksichtigen, soll der Text in Stichpunkten ausgeführt werden:

- Die Größe der Untergrundspeicher in Deutschland ¹¹ beträgt 23,3 Mrd m³(Vn). Die Abkürzung „(Vn)“ bedeutet Volumen unter Normbedingungen bei 1013 hPa und 15°C.
- Unter Normbedingungen wäre zur saisonalen Energiespeicherung des gesamten, in Wasserstoff umgewandelten Jahresertrages an Solarenergie ein Speichervolumen von 311 Mrd m³(Vn) erforderlich.
- Für die Speicherung eines Tagesertrages an solarem Wasserstoff würde ein Speichervolumen von 2,6 Mrd m³(Vn) erforderlich. Das wären ca. 11% des gesamten Gasspeichervolumens in Deutschland.

11 https://www.lbeg.niedersachsen.de/energie_rohstoffe/erdoel_und_erdgas/untertagegasspeicher/publikation_untertageerdgaspeicherung/publikation-zur-untertage-gasspeicherung-in-der-zeitschrift-erdoel-erdgas-kohle-898.html?_xCCNotify=1

Fazit

Der Ausbau von Energiespeichern, die für die Funktionsfähigkeit der Maschinen und der Gesellschaft nötig sind, ist sinnvoll. Die Speicherung von Energie ist eine notwendige Aufgabe, die allerdings immer mit hohen Verlusten und hohem Aufwand verbunden ist. Energiespeicher, die das Ziel haben, eine saisonunabhängige kontinuierliche Energieversorgung bereitzustellen, sind aber zu aufwändig und binden zu viele Ressourcen.

Aufgrund der durchgeführten Berechnungen ergeben sich für mich bezüglich der Energiewende folgende Schlussfolgerungen:

1. Energiespeicherung muss die Ausnahme bleiben.
2. Für eine friedliche Zukunft ist die Nutzung erneuerbarer Energien zwingend notwendig, weil dadurch die wirtschaftliche Abhängigkeit des jeweiligen Landes verringert wird. Auf diese Weise sind imperiales Verhalten nicht mehr zwingend nötig, um einen menschenwürdigen Lebensstandard zu erhalten.
3. Die Energiespeicherung sollte am besten in Form von synthetischem Wasserstoff, Methan oder Methanol erfolgen. Auf diese Weise steht gespeicherte Energie mit hoher Energiedichte zu Verfügung.
4. Energie aus Sonne und Wind soll, wenn sie gewonnen wird, am besten gleich verbraucht werden. Dazu sind Produktionsanlagen nötig, die bei Energiemangel spontan in den Standby-Modus übergehen können. Für die Wintermonate, Dezember, Januar und Februar sollte die gesamte Wirtschaft, überall wo es möglich ist, in den Standby-Modus wechseln.
5. Menschen können bei Energiemangel nicht in den Standby-Modus gehen. Deshalb ist die Produktion so weit wie möglich zu automatisieren.

Anhang

Stoffwerte

$$R_{H_2} = 4122,4 \frac{J}{kg K}$$

$$H_{0,H_2} = 141,5 \cdot 10^6 \frac{J}{kg K}$$